

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Analytické hodnocení svařitelnosti vysokolegovaných ocelí

Analytical Evaluation Weldability of Stainless Steels

Student:

Marek Szotkowski

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Szotkowski**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Analytické hodnocení svařitelnosti vysokolegovaných ocelí**
Analytical Evaluation Weldability of Stainless Steels

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii problematiky svařování a svařitelnosti vysokolegovaných ocelí.
2. Proved'te rozbor možnosti predikce struktury při svařování vysokolegovaných ocelí.
3. Navrhněte a realizujte program pro predikci struktury při svařování vysokolegovaných ocelí na pozadí programu MS Excel.
4. Funkci programu ověřte na zkušebním souboru ocelí a proved'te diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


HRIVŇÁK, I. *Teoria zvariteľnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.
ČSN EN 1011-3 Doporučení pro svařování kovových materiálů-Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí, Duben 2002.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**


Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5.2010

Marik Zerkowski

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, же оdevздáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2010


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Marek Szotkowski

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Žihla 975, Jablunkov 73991

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SZOTKOWSKI, M. *Analytické hodnocení svařitelnosti vysokolegovaných ocelí : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 45 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Bakalářská práce se zabývá analytickým hodnocením svařitelnosti vysokolegovaných ocelí. V úvodu jsou popsány vysokolegované oceli a jejich možnosti svařování. Na základě charakteristiky jednotlivých diagramů používaných k odhadu výsledné struktury svarového kovu je zhotovená aplikace na platformě Microsoft Office Excel. Aplikace byla doplněna několika novými diagramy a modifikacemi, které se v poslední době objevily. Obsahuje také několik volitelných funkcí, které zjednodušují ovládní a urychlují odhad struktury. Vytvořená aplikace se využije při tvorbě nových svarových spojů, u kterých se zjistí možné vady a vhodným způsobem se docílí jejich odstranění nebo jejich minimalizaci.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SZOTKOWSKI, M. *Analytical Evaluation Weldability of Stainless Steels : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanical technology, 2010, 45 p. Thesis head: Ochodek, V.

The bachelor thesis deals with the analytical evaluation of stainless steel weldability. At the beginning there is stainless steel and its ability to welding described. Based on the characteristics of diagrams that are used to estimate the final weld metal structure there is made an application in the Microsoft Office Excel. The application was replenished by several new charts and modifications that have recently emerged. It also contains several optional features that simplify operation and speed estimation structure. Created application is used in creation new welded joints where possible defects are found and we can choose an appropriate manner to eliminate them or minimize them.

OBSAH

OBSAH.....	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	7
0 ÚVOD	8
1. SVAŘOVÁNÍ A SVAŘITELNOST VYSOKOLEGOVANÝCH OCELI	10
1.1. Rozdělení podle vlastnosti	12
1.1.1. Korozivzdorné oceli.....	12
1.1.2. Žárovzdorné oceli	12
1.1.3. Žáropevné oceli	12
1.1.4. Otěruvzdorné oceli.....	13
1.1.5. Oceli pro nízké teploty.....	13
1.1.6. Oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.....	13
1.2. Rozdělení podle struktury	13
1.2.1. Austenitická korozivzdorná ocel	15
1.2.2. Feritická korozivzdorná ocel	17
1.2.3. Austeniticko-feritická korozivzdorná ocel tzv. duplexní.....	19
1.2.4 Martenzitická korozivzdorná ocel	22
1.2.5 Martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel.....	23
1.2.6 Manganová austenitická ocel.....	24
1.3. Rozdělení podle označení	25
2. ROZBOR PREDIKCE STRUKTURY PŘI SVAŘOVÁNÍ VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ.....	26
2.1. Schaefflerův diagram.....	26
2.2. De Longův diagram	27
2.3. WRC diagram	28
2.4. Espy diagram	29
2.5. Ostatní diagramy.....	30
3. PROMÍSENÍ SVAROVÉHO KOVU.....	31
4. CÍLE.....	33
5. POPIS VYTVOŘENÉ APLIKACE	34
6. ODHAD STRUKTURY PODLE VYTVOŘENÉ APLIKACE.....	36
7. ZÁVĚR	42
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČSN	Česká technická norma
FN	feritové číslo
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
MAG	(GMAW) - 135 - obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
MIG	(GMAW) - 131 - obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
TIG	(GTAW, WIG) - 141 - obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
TOO	tepelně ovlivněná oblast
Cr _E	ekvivalent chromu
Ni _E	ekvivalent niklu
Obr.	obrázek
R _e	mez kluzu [MPa]
R _m	mez pevnosti [MPa]
Tab.	tabulka
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
cca.	cirka
hm. %	hmotnostní procento
např.	například
tzv.	tak zvaná

0 ÚVOD

Gabriel Laub (1928 – 1998) „Počítače se mýlí mnohem přesněji“. Řešení problému předběžného odhadu výsledné struktury u svarového kovu vysokolegovaných oceli je základem k možnému vyřešení problému vznikajícím po svařování. Jako jsou různé vady svaru, které snižují vlastnosti takového spoje. V dnešní době, při stálém růstu podílu vysokolegovaných ocelích je takový správný odhad stále důležitější.

Aplikace, tvořená na platformě Microsoft Office Excel bude pro svou dostupnost vhodným řešením pro široký okruh zájemců. Mezi zájemci o tento produkt budou patřit především konstruktéři a technologové zabývající se výsledky struktury svarového kovu, který vznikne po svařování vysokolegovaných oceli. Program Excel je velice rozšířený, dalo by se říci, že program Excel má téměř každý počítač. Jakož to základní pomůcka při tvorbě tabulek, grafů apod. není příliš náročný na ovládání pro uživatele ani pro paměť daného počítače. Při používání výsledné aplikace nebude zapotřebí jakákoli další instalace.

Řešení problému je několik a možné aplikace k odhadu výsledné struktury svarového kovu již existují, ale tato aplikace bude mnohem přesnější s větším množstvím použitých veličin, které tento problém ovlivňují. Bude obsahovat i funkci, která odhalí možná rizika vad svaru.

Odhad možné struktury je možné mnohem dříve než se začne realizovat samotné svařování, tímto se ušetří nemalé finanční prostředky firmy. Při zjištění nežádoucí struktury bude možné upravit jednotlivé veličiny, které ovlivňují výslednou strukturu svarového kovu, tak aby výsledek odpovídal požadavkům zadavatele. Možností je i využití výsledné aplikace k předběžné kontrole svarového kovu po svařování, ještě před přesnějším metalografickým ověřením struktury svarového kovu.

Výsledná aplikace bude obsahovat zpřesnění jednotlivých používaných diagramů k odhadu výsledné struktury svarového kovu, tak aby odpovídal nejnovějším postupům, které se za poslední dobu v tomto odvětví svařování docílilo.

Touto prací se rozšíří okruh diagramu, které se používají k odhadu výsledné struktury svarového kovu. Nejsou tak všeobecné jako ty základní diagramy, které se používají už řadu let, ale pro větší okruh možných uživatelů této aplikace budou velmi vhodné. Také možné další vlivy, které ovlivňují výsledný svarový kov budou popsány v této práci a budou zahrnuty do výsledné aplikace.

1. SVAŘOVÁNÍ A SVAŘITELNOST VYSOKOLEGOVANÝCH OCELI

Vysokolegované oceli obsahují víc jak 10 % celkového obsahu přidávaných prvků tzv. legur. Podle ČSN jsou zařazeny do 17 třídy oceli. Ve směrnici CR ISO 15608 jsou ve skupině 8 až 10.

Vysokolegované oceli přebírají vlastnosti legujících prvků a tím příznivě ovlivňují jejich chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. Mezi základní legující prvky patří chrom, nikl, křemík, molybden, mangan atd. Tyto prvky mají i nežádoucí vlastnosti, které je nutno brát na zřetel viz. Tab. 1.

Tab. 1 – Označuje vlastnosti jednotlivých prvků často používaných v ocelích [5]

	S	Cr	Ni	S	Mn	Si	P	Cu	Mo	Se	Ti,Nb
Odolnost proti korozi		+	+	-			+		+		
Mechanické vlastnosti	+	+			+	+	+	+	+		+
Odolnost proti vysokým teplotám		+	+	-					+		+
Obrobitelnost	-	-		+			+			+	
Svařitelnost	-	-		-	+		-		+		+
Odolnost za studena	-	-	+	-				+			

Chrom - zvyšuje silně prokalitelnost oceli. Strukturu chromových ocelí ovlivňuje silně obsah uhlíku. Zpomaluje pokles tvrdosti popouštění, zvyšuje odolnost proti korozi a opalu. Chrom je karbidotvorný prvek, který výrazně zpevňuje ocel i svarový kov.

Nikl - Snižuje transformační teploty oceli a při vyšším obsahu niklu v oceli má přeměna austenitu na ferit martensitickou povahu. Nikl zvyšuje prokalitelnost, zlepšuje tvárnost a houževnatost ocelí při nízkých teplotách, zejména v kaleném a nízko popouštěném stavu.

Uhlík - je přítomen ve všech ocelích a rozhodujícím způsobem ovlivňuje svařitelnost. Ovlivňuje především mechanické vlastnosti oceli. S rostoucím obsahem uhlíku rostou hodnoty R_e a R_m v oceli a snižují se její plastické vlastnosti. S rostoucím obsahem uhlíku v oceli se zvyšují také hodnoty tvrdosti martenzitu, který vzniká ve svarech při velkých rychlostech ochlazování.

Molybden - silně zvyšuje prokalitelnost. Pokud je molybden rozpuštěn v tuhém roztoku přispívá k substitučnímu zpevnění materiálu. Výrazně precipitačně zpevňuje ocel i svarový kov.

Dolegováním Ni, Cr, Mo a V do oceli nebo svarového kovu způsobí zvýšení potřebných teplot předehřevu pro zabránění vzniku studených trhlin ve svarových spojkách.

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvořit za určitých podmínek spoje požadovaných vlastností (ČSN 05 1310)

Při svařování všemi metodami dochází vlivem ohřátí k určitým změnám základního materiálu. Tyto změny mohou být nepříznivé a trvalé. Nejčastěji jde o změny struktury, vyvolané ohřevem a následným chladnutím. Jde o vznik pnutí vyvolaných změnami teplot a o změny rozměrů a tvarů.

Po svařování se některé oceli žíhají z důvodu snížení napětí. Na velikost a charakter svarových napětí a deformací má vliv celkové řešení konstrukce, technologie svařování a druh základního materiálu.

U svařování vysokolegovaných oceli požadujeme, stejně jako u jiných kovových materiálu, aby měl TOO stejné mechanické vlastnosti jako materiál neovlivněný svařováním. Je potřeba snížit tepelný příkon z důvodu nižší hodnoty tepelné vodivosti, oproti uhlíkovým ocelím mají také větší tepelnou roztažnost a větší elektrický odpor.

Rozdělení vysokolegovaných oceli jde podle více hledisek, v této práci je rozdělení podle vlastností, které se uplatňují v různých oborech průmyslu a podle jejich struktury.

Vysokolegované oceli můžeme dělit podle vlastností a to z důvodu:

- zlepšení korozivních vlastností
- zlepšení žáruvzdorných vlastností
- zlepšení žáropevných vlastností
- zvýšení odolnosti proti opotřebení
- zlepšení vlastností za nízkých teplot
- dosažení zvláštních fyzikálních vlastností

1.1. Rozdělení podle vlastností

1.1.1. Korozivzdorné oceli

Koroze je samovolně a postupně probíhající děj, který vede k nežádoucímu rozrušování tuhých látek elektrochemickými a chemickými účinky okolního prostředí. Korozivzdorná ocel je slitina na bázi železa s obsahem Cr větším jak 12 % ve starších literaturách [1], [2] a v novějších [8] 10,5 % a obsahu C menších jak 1,2 %.

Na povrchu vzniká pasivní vrstva, která se při porušení sama obnovuje a dodává ji odolnost proti korozi.

Odolnost proti korozi ztrácí při styku s kyselinou solnou a kyselinou sírovou. Zlepšení odolnosti oceli proti těmto kyselinám dosáhneme přidáním Ni.

1.1.2. Žárovzdorné oceli

Žárovzdorné oceli odolávají vysokým teplotám (až 1200 °C podle druhu oceli). Žárovzdornost je zaručena tím, že na povrchu oceli se vytvoří vrstva kysličníku (okují), která je pevně uchycena na kovovém povrchu a tím zabrání okysličování kovu do hloubky. Ocel bez této ochrany se také pokryje vrstvou okují, ale ty nejsou pevně přichyceny k povrchu a po průniku kyslíku do kovu se odlupují.

Základní přísadou žárovzdorných ocelí je chrom. Obsahují jen chrom což jsou pak oceli feritické a nebo obsahují nikl v takovém množství, že mají pak strukturu austenitickou. Vhodnou přísadou jsou taky křemík a hliník.

1.1.3. Žáropevné oceli

Žáropevné oceli mají velkou odolnost proti nárůstu trvalé deformace s časem při působení napětí při vysokých teplotách (tečení). Vysokolegované žáropevné oceli se používají až do 750 °C a jsou buď feritické nebo austenitické.

1.1.4. Otěruvzdorné oceli

V českých technických normách jsou vedeny pod názvem oceli odolné proti opotřebení. V České republice se používána nejodolnější ocel tzv. Hadfieldová ocel o obsahu 1,3 % C a 13 % Mn. Je to austenitická ocel, po kalení se zpevní pomocí tzv. deformačního martenzitu.

1.1.5. Oceli pro nízké teploty

Skupinu tvoří vysokolegované chromniklové austenitické oceli, které jsou velmi houževnaté a to je při kryogenních teplotách zapotřebí, aby se nechovaly křehce.

Vhodné jsou i martenzitický stárnoucí oceli tzv. maraging oceli. Obsahují 12 % až 20 % Ni. Vysokých pevnostních charakteristik se docílí až precipitačním vytvrzením martenzitu.

1.1.6. Oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Slitina s definovaným součinitelem teplotní roztažnosti jsou legovány zejména Ni jako Invar obsahuje 35 % - 37 % Ni, Superinvar a Kovar.

Slitina s vysokým měrným elektrickým odporem jako Nichrom s 60 % Ni a Fechal s 15 % Cr.

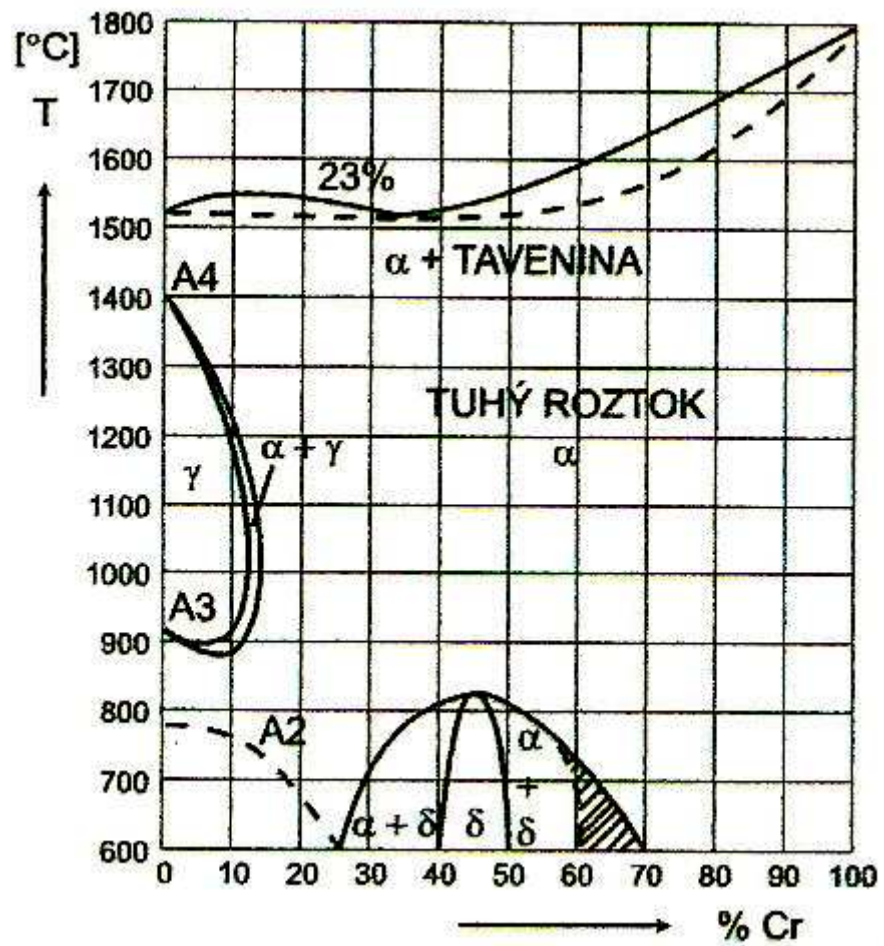
Slitiny s definovaným součinitelem modulu pružnosti, obsahují 36 % Ni, 12 % Cr zbytek železa a nazývají se Elinvary.

Oceli se zvláštními magnetickými vlastnostmi, užívají se pro permanentní magnety a obsahují Cr, W, Si a C.

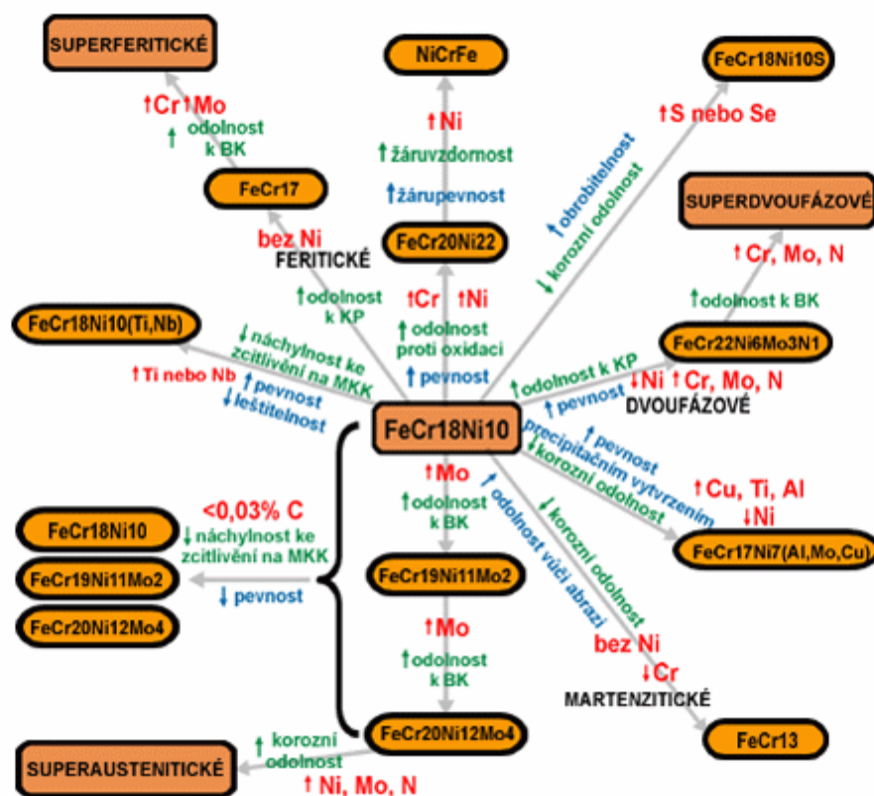
Mezi výše uvedenými oceli není pevná hranice, která by jasně definovala vhodné metody a postupy svařování a tak bude lepší důkladněji rozdělit vysokolegované oceli podle jejich struktury.

1.2. Rozdělení podle struktury

Struktura vysokolegovaných korozivzdorných ocelí [1], [3] závisí na chemickém složení. Základní strukturu chromové oceli určuje diagram železo - chrom Obr. 1. Při jeho aplikaci je potřeba brát na zřetel vliv uhlíku, který rozšiřuje oblast γ směrem k vyšším obsahům chromu.



Obr. 1 – Základní rozdělení struktury chromové oceli



Obr. 2 – Grafické znázornění základních vysokolegovaných ocelí a jejich vlastností s jejich strukturou [19]

1.2.1. Austenitická korozivzdorná ocel

Tato ocel je nejrozšířenějším druhem korozivzdorné oceli hlavně pro její dobrou tvařitelnost a svařitelnost. V žíhaném stavu, které jsou obvykle dodávány jsou nemagnetické a nedají se kalit. Mezi tuto ocel se řadí ocel s označením EN 1.4301 s 18 % Cr a 8 % Ni. Chemické složení je uvedeno v EN 10088-1.

Tab. 2 – Základní chemické složení austenitické korozivzdorné ocele

Chemické složení	
C	≤0,1 %
Cr	16 % - 28 %
Ni	3,5 % - 32 %
Mo	≤ 7 %

Mohou obsahovat také N, Ti, Nb, Cu, Si a S ke zlepšení konkrétních vlastností, jako korozní odolnost, obrobiteľnosť nebo odolnosť proti oxidaci atd.

Mikrostruktura austenitických korozivzdorných ocelí je určena rovnováhou mezi stabilizujícími prvky feritu a austenitu, mřížku má kubickou plošně centrovanou. Hlavní prvky stabilizace austenitu je Ni, Mn, C a N. Stabilizace feritu je hlavně Cr, Mo a Si. Struktura ve svarovém kovu lze předpovídat pomocí diagramu Schaefflera, DeLonga, W.R.C. nebo Espy. Austenitická korozivzdorná ocel obvykle obsahuje malé množství delta feritu při svařování se pak obsah feritu zvyšuje.

Struktura s obsahem feritu není náchylná k trhlinám za tepla, má dobrou odolnost proti mezikrystalické korozi u nízkouhlíkových a stabilizovaných ocelí. Mají výbornou pevnost a tvárnost. Křehnutí se může vyskytnout po dlouhém vystavení teploty 550 °C až 900 °C v důsledku rozpadu feritu do formy sigma fáze.

Plně austenitická struktura, která se používá výjimečně je náchylnější k trhlinám za tepla během tuhnutí. Příčinou vzniku tepelných trhlin jsou prvky jako S, P, Si, Ti, a Nb, které mohou při tuhnutí snižovat plasticitu kovu nebo vytváří se železem a niklem nízko tavitelná eutektika, která snižují technologickou pevnost hranice zrna.

Vznik tepelných trhlin je možno redukovat:

- snížením tepelného příkonu svařování
- použitím přídatných materiálů s obsahem δ - feritu do 5 %

Svařování austenitické korozivzdorné oceli - je vhodné všemi běžnými metodami, metody jsou uvedené v EN 1011-1. Tepelný příkon má být nízký, stejně jako se nemá používat přehřev pro snížení nebezpečí deformace, praskání za tepla, zcitlivění a precipitaci intermetalické fáze. Při přehřevu je nebezpečí snížení korozní odolnosti.

Příprava svarových spojů je podobná jako u uhlíkových ocelí. Rozdíl je jen v úhlech sklonu a v kořenových mezerách. U svařování tenkých plechu je možno svařovat i bez přidání přídatného materiálu.

Přídatné materiály se volí v souladu s doporučením výrobce. U svařování struktury s obsahem feritu jsou materiály voleny tak, aby bylo dosaženo obsahu feritu mezi 3 FN až 15 FN ve svarovém kovu. U plně austenitický struktury se přídatné materiály mohou mírně přelegovávat a to manganem a to pro snížení nebezpečí vzniku tepelných trhlin.

Pro stanovení, zda svařovací materiál poskytne správný obsah feritu se používá Schaefflerův, DeLongův, W.R.C. nebo Espy diagramů. Vyšší podíl delta feritu může

zhoršovat korozní odolnost svarového kovu. V takovém případě je třeba svarový kov žíhat. Pro měření delta feritu ve svarových kovech se využívá jeho magnetické vlastnosti, který je obsažen v jinak nemagnetickém austenitu.

Pro svařování superaustenitické ocele se používají přídatné svařovací materiály na bázi niklu.

Ochranné plyny pro metody svařování:

- MIG/MAG (131,135) - je široký sortiment plynu a volit podle EN 439
- WIG (141)- argon, argon-vodík, argon-helium nebo jejich kombinace v souladu s EN 439
- Nedoporučuje se použití plynu CO_2 o obsahu větším jak 2,5 % z důvodu nasycení uhlíkem a dusíkem.
- Pozornost je třeba věnovat i plynům, které by mohli zapříčinit pórovitost zrna.
- Do úvahy při svařování je třeba vzít malá tepelná vodivost a velký koeficient tepelné roztažnosti této ocele.

Důsledky svařování - vzhledem k vysoké tvárnosti a houževnatosti je tato ocel málo náchylná na vznik studených trhlin za studena.

Některé svařence mohou být náchylné na vznik teplých trhlin, což zahrnuje praskání během rekrytalizace a praskání v TOO svarových kovu nebo základního materiálu. Mechanické vlastnosti a to tažnost a houževnatosti se může mírně zhoršit. Tyto případy se stávají u vysokého obsahu Cr, Mo, Si a zároveň u vysokého tepelného příkonu.

- Tepelné zpracování není u austenitických korozivzdorných oceli nutné.

1.2.2. Feritická korozivzdorná ocel

Ocel má vyšší elektrický odpor a je vždy magnetická. Má nízký obsah C a jsou nevytvrditelné tepelným zpracováním. Nejpoužívanější je ocel značky EN 1.4016 s 17 % Cr.

Tab. 3 – Základní chemické složení
feriticko korozivzdorné ocele

Chemické složení	
C	≤0,08 %
Cr	10,5 % - 30 %
Mo	≤ 4,5 %

Mohou obsahovat Ni, Al, Ti, Nb, Ta, nebo Zr ke zlepšení různých vlastností.

Mikrostruktura závisí na poměru feritických a austenitických prvků, které rozhodují o složení oceli jako **plně feritická ocel** nebo ferit s podílem martenzitu a to **poloferitická ocel**.

Plně feritická struktura je při teplotě nad 950 °C náchylná na růst zrn což má za následek sníženou houževnatost. Pozdějším tepelným zpracováním se houževnatost nezlepší. Plně feritická struktura stabilizované Ti a Nb má uspokojivou tvárnost a lepší pevnost oproti poloferitickým ocelím.

Poloferitická ocel a to u tlustostěnné vrstvy dochází ke snížení tažnosti a mezikrystalické korozi s místním ochuzením Cr. Ochuzení lze předejít při nízkém obsahu C, nebo pomocí stabilizace Ti, Nb/Ta nebo Zn. Náchylná ke křehnutí růstem zrn při teplotě okolo 1150 °C. Špatná pevnost a tvárnost, po svařování tepelné zpracování obnovuje mechanické vlastnosti a odolnost proti mezikrystalické korozi.

Intermetalické precipitáty se mohou objevit při obsahu Cr a Mo a v obsahu větším než 22 % a v teplotách od 550 °C do 850 °C.

Svařování feritických korozivzdorných ocelí - lze dobře pomocí těchto metod:

- 111 - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
- 131 - MIG obloukové svařování tavicí se elektrodou v inertním plynu
- 135 - MAG obloukové svařování tavicí se elektrodou v aktivním plynu
- 141 - WIG obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
- 15 - plazmovým svařováním

Jiné metody svařování lze použít jen po dohodě s výrobcem, jako třeba:

- 51 - elektronové svařování
- 52 - laserové svařování
- 291 - vysokofrekvenční odporové svařování

Z důvodu nadměrné náchylnosti růstu zrn u feritických ocelí je potřeba volit tepelný příkon co nejnižší.

Některé feritické ocele mají tendenci tvořit na hranicích zrn martenzit, a proto předehřev v tomto případě může eliminovat praskání v TOO a také snižuje pnutí. Je vhodné použít mírný předehřev okolo 100 °C, aby se oblast spoje dostal nad tranzitní teplotu houževnato-křehkého lomu. Použití předehřevu u poloferitických ocelí v tloušťce materiálu nad 3 mm má být od 200 °C do 300 °C.

Je potřeba dbát na co jak nejnižší nasycení uhlíku a dusíku během svařování.

Vzhledem k vyšší tažnosti austenitického svarového kovu je dávana přednost tomuto materiálu jako přídavného. Z důvodu korozní odolnosti se nedoporučuje aby obsah chromu ve svarovém kovu byl nižší než v základním materiálu. Při svařování metodou 141 - WIG lze svařovat i bez přídavného materiálu.

Ochranné plyny pro metody svařování:

- směsi na bázi argonu podle EN 439
- směs nesmí obsahovat CO₂, vodík a dusík.

Důsledky svařování - pokud se svarový spoj nepoužívá při vysokých teplotách, doporučuje se po svařování svařovací kov žíhat při teplotách 700 °C – 800 °C. Tímto žíháním se zvýší odolnost proti mezikrystalové korozi, houževnatost svarového kovu, snižuje se také zbytkové napětí.

Tato ocel není obvykle náchylná na tepelné trhliny. Může být náchylný na studené trhliny v důsledku nízké houževnatosti.

1.2.3. Austeniticko-feritická korozivzdorná ocel tzv. duplexní

Používají se pro jejich pevnost a korozní odolnost. Použití při teplotách -50 °C až 250 °C. Mají dobrou houževnatost a dobrou únavovou pevnost a to i v korosivních médiích. Nejpoužívanější duplexní ocel je EN 1.4462 má 22 % Cr, 5 % Ni a 3 % Mo.

Tab. 4 - Základní chemické složení
austeniticko-feritické korozivzdorné ocele

Chemické složení	
C	≤0,03 %
Cr	21 % - 26 %
Ni	3,5 % - 8 %
Mo	0,1 % - 4,5 %
N	0,05 % - 0,35 %

Některé druhy obsahují navíc Cu a W.

Mikrostruktura duplexní oceli je feritická matrice s hodnotami zhruba 45 % až 60 % austenitu. Tato struktura se docílí rozpouštěcím žíháním při teplotách 1020 °C až 1100 °C. Je náchylná k trhlinám za tepla a ke křehnutí při sigma fázi při teplotě 500 °C až 900 °C.

Duplexní oceli dělíme na nízko legované, středně legované a na vysoko legované.

Svařování astenicko - feritických korozivzdorných ocelí - jsou vhodné běžné metody obloukového svařování podle EN 1011-1. Jejich svařitelnost byla zlepšena optimalizací poměru austenit-ferit a zvýšeným obsahem dusíku. Nadměrné množství feritu v TOO nebo nebezpečí škodlivého růstu zrn po svařování je malé.

Svařování bez přídavného materiálu se nedoporučuje, pokud nebude svarový kov podroben rozpouštěcímu žíhání s rychlým ochlazením. Svařování bez přídavného materiálu a bez následného tepelného zpracování je možné v případě použití ochranného plynu s obsahem dusíku, který podporuje vznik austenitické struktury.

Příprava svarových ploch má být podle EN 29692. V některých případech jako u V - svaru a oboustranného V - svaru je doporučováno použití většího úhlu otevření než u austenitických korozivzdorných ocelí z důvodu lepšího průvaru. Ze stejného důvodu je při svařování kořenové vrstvy metodou WIG (141) a MIG/MAG (131/135), doporučováno použití větší mezery mezi svařovanými materiály než u austenitických ocelí.

Z důvodu vysoké pevnosti má být vzdálenost mezi stehy malá. Předehřev zde není zapotřebí, pro odstranění povrchové vlhkosti se může použít předehřev do maximální teploty 100 °C.

Tepelný příkon se musí držet v určitých mezích. Při nízkém tepelném příkonu je rychlé ochlazování a tvorba feritu. Příliš vysoký tepelný příkon může způsobit precipitaci intermetalických fází. U vysoce legovaném druhu ocelí se volí tepelný příkon v rozmezí 0,2 kJ/mm až 1,5 kJ/mm s maximální tepelnou interpass v rozsahu 100 °C až 150 °C. Tyto hodnoty představují pouze všeobecné doporučení je potřeba zohlednit vliv svařovací metody a tloušťky svařovaných materiálů.

Přídavné materiály musí být přelegovány Ni. Tím je omezen vliv prudkého ochlazení po svařování a velkého promísení základního materiálu v kořenové vrstvě.

Ochranné plyny pro metody svařování:

- zvolené plyny musí být v souladu s EN 439
- při svařování metodou WIG (141) a plazmovým svařováním jsou doporučeny plyny argon, argon-helium nebo argon s obsahem 3 % dusíku. Ochranné plyny s obsahem vodíku se nemají používat.
- při svařování metodou MAG (135) jsou vhodné plyny argon s obsahem až 2,5 % oxidu uhličitého, směs argon-helium-kyslík, směs argon-helium-oxid uhličitý nebo plyny s obsahem až 3 % dusíku.
- při obloukovém svařování plněnou elektrodou se má ochranný plyn konzultovat s výrobcem ochranných plynů.

Důsledky svařování - oceli s vyšším obsahem chrómu, molybdenu a wolframu jsou náchylnější na precipitaci intermetalických fází, a to může mít škodlivý účinek na korozní odolnost a mechanické vlastnosti. Vzhledem k feritické krystalizaci má ocel nízkou citlivost na tepelné trhliny.

Pevnost svarových kovů duplexní korozivzdorné ocele vždy převyšuje minimální pevnost odpovídajícího základního materiálu. Jejich tažnost naopak klesá. Vrubová houževnatost svarového kovu je menší oproti základnímu materiálu, závisí na obsahu feritu, metodě svařování a na použitých svařovacích materiálech.

Pro dosažení maximální korozní odolnosti je nezbytným legujícím prvkem dusík. Během svařování metodami WIG (141) a MIG/MAG (131/135) může dojít ke snížení obsahu dusíku. U svarů provedených obalenými elektrodami nebo svařováním pod tavidlem se toto ochuzení dusíku neprojevuje.

1.2.4 Martenzitická korozivzdorná ocel

Ocel je plně martenzitická při pokojové teplotě a proto je velmi tvrdá a křehká. Martenzitická struktura je magnetická. Mezi tuto ocel můžeme zařadit např. EN 1.4303 s 18 % Cr. Vzhledem k vysokému obsahu uhlíku je ocel samokalitelná.

Tab. 5 - Základní chemické složení
martenzitické korozivzdorné ocele

Chemické složení	
C	≤1,2 %
Cr	11,5 % - 17 %
Ni	≤ 6 %
Mo	≤ 1,8 %
V	≤ 0,2 %

Pro dosažení vyšší tažnosti a houževnatosti je nutno tyto oceli popustit, popřípadě žíhat, tím však také dojde ke snížení pevnosti v tahu.

Prísada chrómu zvyšuje prokalitelnost ocele natolik, že i při ochlazení na volném vzduchu se získá martenzitická struktura.

Svařování martenzitické korozivzdorné ocele - je možno v popuštěném, žíhaném, zušlechťeném nebo tvrdém stavu. Předcházející tepelné spravování nemá výraznější vliv na svarový kov.

Zlepšení svařitelnosti se dosáhne především tím, že ocel obsahuje určité množství stabilního austenitu, který rozpustí vodík difundující ze svarového kovu a tím eliminuje studené praskání. Vliv austenitu se projeví také u hodnoty vrubové houževnatosti.

K zabránění studenému praskání této ocele se používají opatření podobné jako u konstrukčních ocelí. Především se používá předehřev, je zapotřebí kontrolovat mezivrstvou (interpass) teplotu, aplikovat dohřev a většinou i tepelné zpracování po svařování.

Pro druhy oceli s obsahem uhlíku větším než 0,1 % se běžně předehřev pohybuje v rozmezí teplot 200 °C – 300 °C. U větších průměru svařovaného materiálu a u vysoce namáhaných spojů se volí i vyšší teploty.

Při obsahu uhlíku do 0,2 % může následovat po svařování pozvolné ochlazování. V případě obsahu uhlíku nad 0,2 % je požadováno žíhání po svařování.

Metody vhodné pro svařování:

- 141 - WIG obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
- 111 - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou

U zvláštních aplikací lze použít:

- 131 - MIG obloukové svařování tavicí se elektrodou v inertním plynu
- 135 - MAG obloukové svařování tavicí se elektrodou v aktivním plynu
- 15 - plazmovým svařováním
- 12 - svařování pod tavidlem

Tepelný příkon se používá např. u 111 - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou od 0,5 kJ/mm do 1,5 kJ/mm. To znamená vyvarovat se příliš vysokého nebo příliš malého tepelného příkonu.

Důsledky svařování - se neprojevují v podobě tepelných trhlin. Je však nutno dodržovat čistotu.

Korozivzdorná odolnost je nižší než u austenitických ocelí hlavně u šěrbinové a důlkové korozi.

V případě svařování s přídavným materiálem na bázi austenitu není nutné používat po svařování tepelné zpracování. V případě použití přídavných materiálů stejného chemického složení je pro dosažení optimálních vlastností požadováno po svařování tepelné zpracování.

1.2.5 Martenziticko-austenitická korozivzdorná ocel

Tyto ocele byly vytvořeny především na stavbu vodních turbín. Při kalení vzniká martenzitická struktura s určitým obsahem austenitu mezi 35 % - 20 % z celkové struktury. Tímto je dosaženo nižší pevnosti a tvrdosti, ale vyšší tažnosti.

Tab. 6 - Základní chemické složení
martenziticko-austenitické korozivzdorné ocele

Chemické složení	
C	0,04 % - 0,08 %
Cr	13 % - 16 %
Ni	4 % - 6 %
Mo	1 % - 2 %

Svařování martenziticko - austenitické korozivzdorné ocele - v popouštěném stavu se dá i bez předehřevu. Nebezpečí studeného praskání v TOO zde nehrozí.

Jinak se pro tloušťku ≤ 8 mm předehřev také nepoužívá. V případě větších průměrů svařovaného materiálu může být předehřev v rozsahu teplot 100 °C až 200 °C. Jsou používány především přídavné materiály stejného chemického složení.

Metody vhodné pro svařování:

- 111 - ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
- 141 - WIG obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu

V určitých zvláštních aplikacích se používají:

- 131 - MIG obloukové svařování tavicí se elektrodou v inertním plynu
- 135 - MAG obloukové svařování tavicí se elektrodou v aktivním plynu
- 12 - svařování pod tavidlem
- 15 - plazmovým svařováním

Důsledky svařování - u této oceli se nevyžaduje tepelné zpracování z důvodu zlepšení mechanických vlastností. Precipitačně zpevněné druhy oceli jsou běžně svařovány ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Při použití přídavného materiálu stejného chemického složení je tepelným zpracováním rozpouštěcí žíhání s rychlým ochlazením následované vytvrzením. Tento postup má být proveden podle doporučení výrobce.

1.2.6 Manganová austenitická ocel

Také nazývaná Haldfieldská ocel je velmi houževnatá a nemagnetická. Při pokojové teplotě je mikrostruktura z důvodu vysokého obsahu manganu plně austenitická.

Tab. 7 - Základní chemické složení
manganové austenitické ocele

Chemické složení	
C	0,7 % - 1,45 %
Mn	11 % - 14 %
Cr	1,5 % - 2,5 %
Ni	3 % - 4 %
Mo	0,8 % - 2,1 %

Z důvodu získání speciálních vlastností se do oceli přidávají prvky jako vanad, měď a titan. Ocel má vysoký koeficient teplotní roztažnosti a nízký koeficient teplotní vodivosti.

Svařování manganu - austenitické ocele - lze bez předehřevu a při minimálním tepelném příkonu, aby nedošlo k vyžhání tepelné ovlivněné oblasti s následnou precipitací karbidické zóny.

Doporučuje se ruční obloukové svařování. Ke svařování jsou vhodné elektrody s podobným chemickým obsahem nebo s vyšším obsahem chromu a manganu.

Doporučuje se, aby teplota okolí kolem svaru nepřesáhla 320 °C a v případě překonání této teploty přerušit svařování, až do vychladnutí svaru.

1.3. Rozdělení podle označení

Číselné označování a rozdělení oceli je přizpůsobené evropským normám. Původní norma ČSN 42 0002 byla přepracovaná a nahrazena normou ČSN EN 10020 s platností od 1.7. 1994.

ČSN EN 10027-1 – tato norma stanoví pravidla pro stavbu značek ocelí pomocí určujících písmen a číslic vyjadřujících použití a hlavní charakteristiky, např. mechanické, fyzikální, chemické, tak aby poskytl zkrácenou identifikaci oceli. Norma slouží jako metodický podklad při unifikaci národních značek členů evropské normalizace při tvorbě výrobních norem hutních polotovarů. Platí pro oceli specifikované v evropských normách (EN), technických specifikacích (TS), technických zprávách (TR) a národních normách členů CEM. Pravidla se mohou používat i pro nenormalizované oceli. Systém číselného označení oceli je uveden v ČSN EN 10027-2.

ČSN EN 10027-2 – tato část stanoví pravidla pro systém číselného označování oceli. Stanovuje stavbu čísel oceli, organizaci jejich registrace, přidělování a rozšiřování.

Tab. 8 - Základní rozdělení a varianty jiných norem

ČSN	EN ISO	DIN
17 020	X6Cr13	1.4000
17 021	X12Cr13	1.4006
17 022	X20Cr13	1.4021
17 023	X30Cr13	1.4028

2. ROZBOR PREDIKCE STRUKTURY PŘI SVAŘOVÁNÍ VYSOKOLEGOVANÝCH OCELÍ

Konečnou strukturu Cr - Ni oceli ovlivňuje kombinace feritotvorných a austenitotvorných prvků ve struktuře oceli [6].

- austenitotvorné - **rozšiřují** v rovnovážném diagramu oblast γ a to C, Ni, Cu, Mn, N. Vliv všech austenitotvorných prvků, které ocel obsahuje, je vyjádřen tzv. ekvivalentem niklu Ni_E .

- feritotvorné - **zužují** v rovnovážném diagramu oblast γ a to Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb, V. Vliv všech feritotvorných prvků, které ocel obsahuje je vyjádřen tzv. ekvivalentem chromu Cr_E .

Na základě těchto ekvivalentů byly vytvořeny konstituční diagramy, kterých se používá k odhadům výsledné struktury Cr - Ni austenitických oceli.

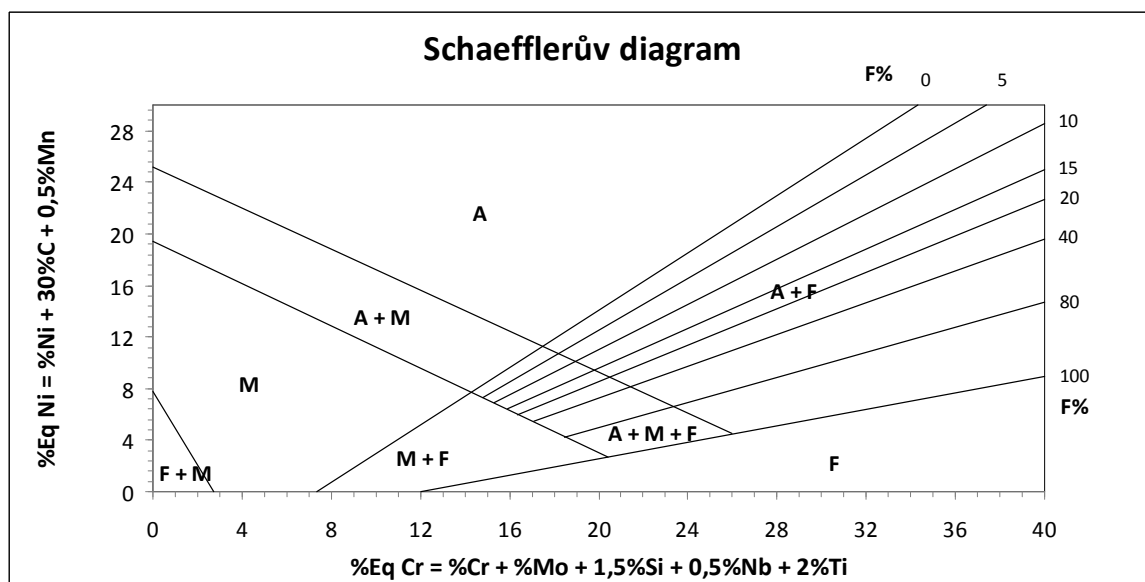
V oblastech A a AF, které se vyznačují hlavní austenitickou krystalizací je více pravděpodobný výskyt krystalizačních tepelných trhlin. Naopak při obsazích FA a F, kde dochází k primární feritické krystalizaci a výskyt krystalizačních tepelných trhlin ve svarovém kovu je méně pravděpodobný.

Níže uvedené diagramy je možné použít k odhadům obsahu feritu a austenitu jak v základním materiálu tak i ve svarových kovech. Při odhadech obsahu feritu ve svarovém kovu je potřeba počítat se stupněm promísení svarového kovu nataveného z přídatného materiálu se základním svařovacím materiálem, který je závislý na použité technologii a parametrech svařování.

Při výsledné struktuře se doporučuje podle [1] obsah δ feritu menší jak 10 % pro jinak její větší náchylnost na korozi a rizika vzniku zkřehnutí.

2.1. Schaefflerův diagram

Vyjadřuje vliv chemického složení [9] na strukturu oceli. Struktura takových to ocelí pak závisí na obsahu prvku, které rozšiřují nebo zužují oblast austenitu. Diagram na Obr. 3 se používá k odhadům výsledné mikrostruktury Cr - Ni austenitické oceli s nízkým obsahem dusíku. Používá se u oceli typu ASTM 308, 310, 312, 316, 317, 318 a 347 s dostatečnou přesností.



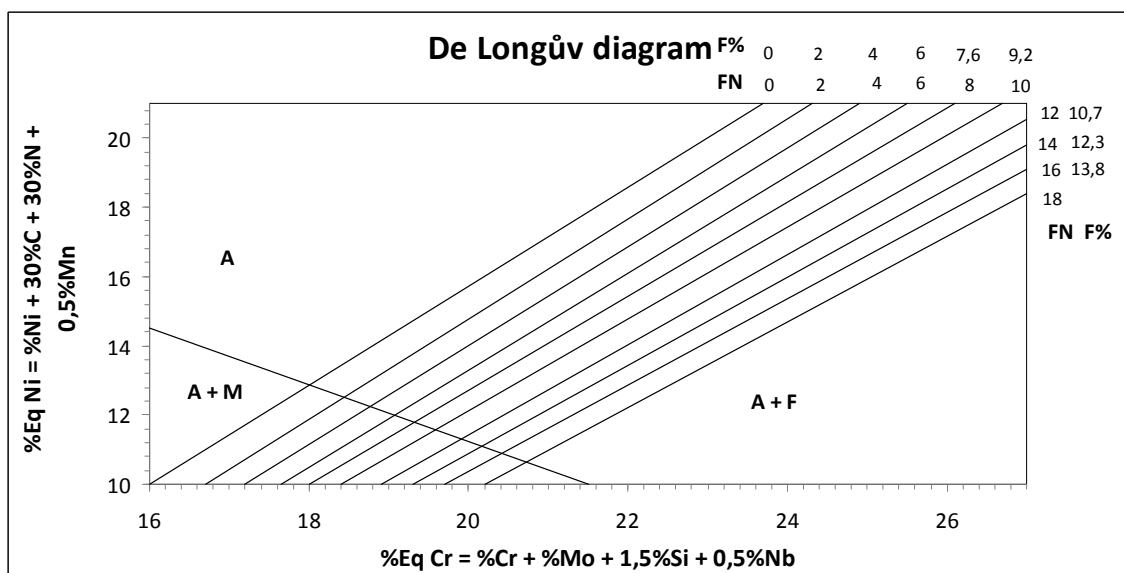
Obr. 3 – Schaefflerův diagram a rozdělení jeho struktury

2.2. De Longův diagram

Do tohoto diagramu na Obr. 4 je zařazen jako významný austenizační prvek dusík s koeficientem 30. Tento diagram upřesňuje Schaefflerův diagram [9].

Tento diagram je vhodný pro austenitické Cr - Ni oceli s obsahem dusíku nebo s obsahem feritu do 15 %. Po normalizaci objemových metod měření obsahu feritu bylo změněno na tzv. Feritové číslo (FN) místo obsahu feritu v %. Při obsahu feritu do 10 % feritu jsou tyto hodnoty prakticky stejné, ale při vyšším obsahu feritu v % ve struktuře zjistíme nižší obsah feritu než ve skutečnosti. Z tohoto důvodu byla dána přednost objemovým metodám.

De Longův diagram není vhodný pro ocele s vyšším obsahem manganu.



Obr. 4 – De Longův diagram a rozdělení jeho struktury

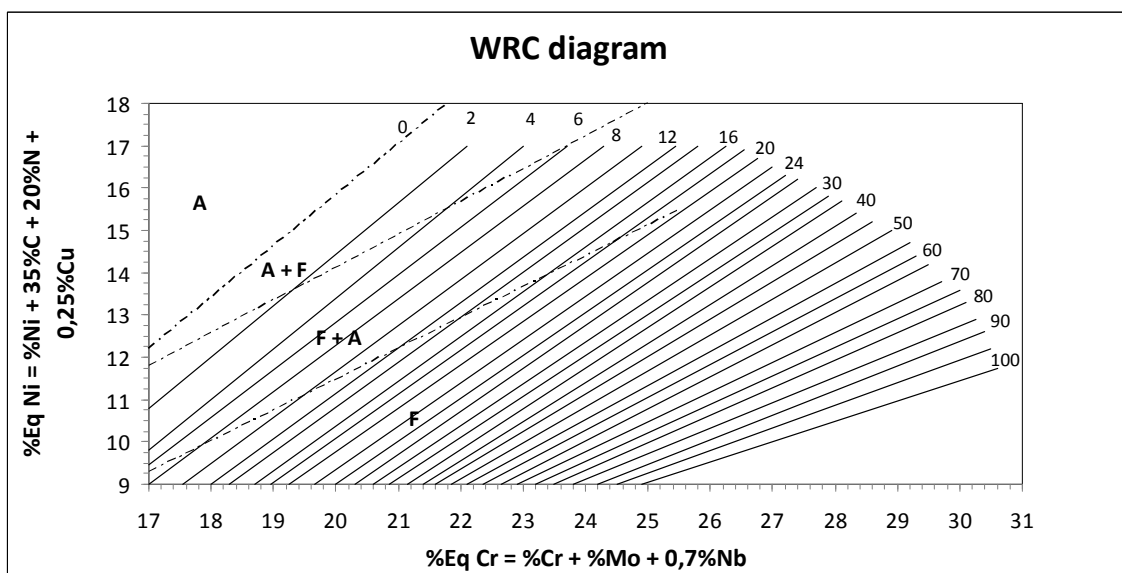
2.3. WRC diagram

Tento diagram na Obr. 5 byl zkonstruován z důvodu možnosti odhadu mikrostruktury u Cr - Ni oceli s vyšším obsahem feritu ve struktuře [9]. Takový odhad pomocí Schaefflerova a De Longova diagramu není možný. Pomocí WRC diagramu lze spolehlivě odhadnout obsah feritu v rozsahu 0 FN až 100 FN. Diagram se používá především u feriticko - austenitických duplexních ocelí.

Výpočet ekvivalentu Cr_E a Ni_E se od výše uvedených diagramů liší tím, že do výpočtu jsou zahrnuty pouze Cr, Mo a Nb u Cr_E a u výpočtu Ni_E obsahy Ni, C, N a Cu. Diagram vyjadřuje také náchylnost na vznik krystalizačních teplých trhlin v závislosti na způsobu krystalizace.

Diagram je vhodný pro oceli s obsahem 10 hm. % manganu a 0,25 hm. % dusíku. Přesnost stanovení feritu ve struktuře se snižuje při obsahu nad 1 hm. % křemíku a nad 3 hm. % molybdenu.

Je konstruován pro rychlosti ochlazování odpovídající svařování elektrickým odporem.



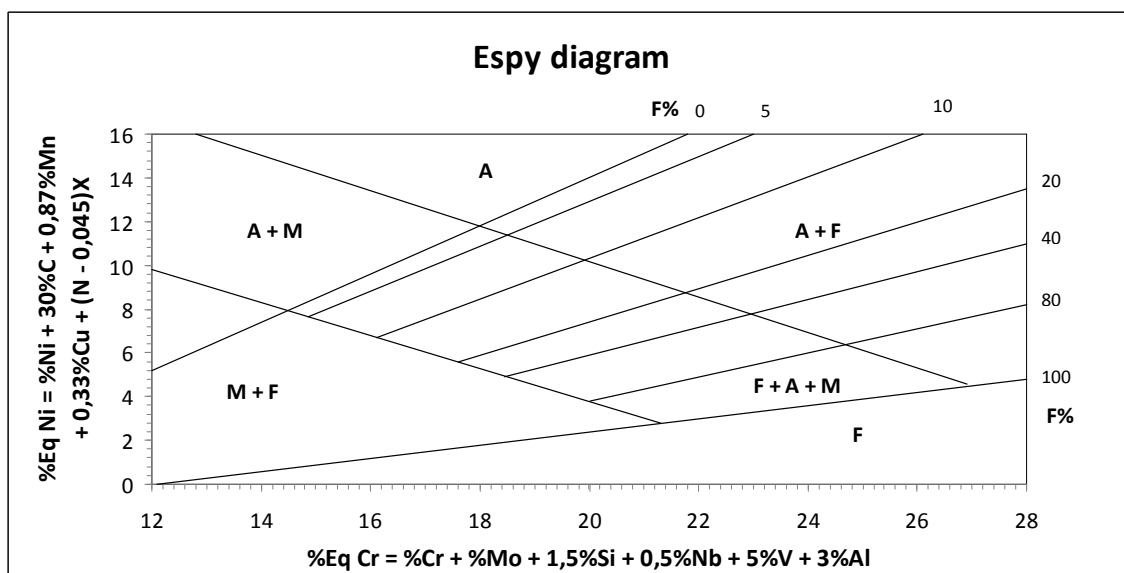
Obr. 5 – WRC diagram a rozdělení
jeho struktury

WRC Mn diagram – je upravený diagram podle Obr. 5 tak, aby odrazil zkušenosti s větším obsahem Mn [18]. Hranice martenzitu je u tohoto diagramu od 1 % do 10 %.

2.4. Espy diagram

Z důvodu vysoké ceny niklu [16] se začínají používat oceli s nízkým obsahem tohoto prvku. Náhračkou za nikl se používá dusík, z důvodu jeho lepšího rozpuštění ve slitině železa se používá mangan. Dusík je vhodný pro zvýšení odolnosti vůči tepelnému popraskání, je také vhodný proti korozi. Obvykle se používá dusík v téhle oceli v rozmezí 0,001 % - 0,27 %. Dále se používá měď pro snížení rychlosti kalení této oceli. Obsah mědi se pohybuje mezi 0,01 % - 3,11 %.

Tento diagram je vhodný k predikci struktury při svařování nízko niklové Cr-Mn-N nerezové oceli.



Obr. 6 - Espy diagram a rozdělení
jeho struktury

2.5. Ostatní diagramy

Balmforthův diagram – tento diagram podle [13] přesněji odhaduje výslednou svarovou strukturu u martenzitické a feritické nerezové ocele. Diagram by měl být používán pouze u ocele svařované obloukovým svařováním. Použití laseru a elektronového svařování, může mít za následek různé podíly feritu a martenzitu a mohlo by podpořit zachování austenitu.

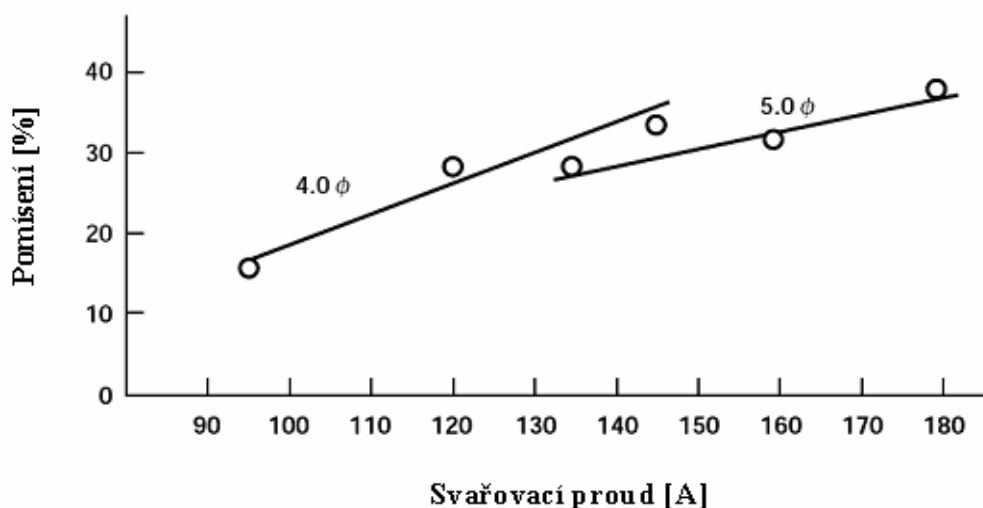
Kaltenhauserův diagram – používá se u martenzitické ocele o obsahu 9 % – 12 % Cr. Tento diagram podle [14] je vylepšením Schaefflerova diagramu. U vzorce vypočítávajícího diagram byly zvýšené účinky feritických prvků Mo a Si. Vzorec obsahuje prvky Ti a Al, ale už ne W, Cu a C. Právě z důvodu absence W ve vzorci je nevhodné použití tohoto diagramu u vysoce silné 9 % – 12 % oceli.

Schneiderův diagram - se také používá u martenzitické ocele o obsahu 9 – 12 % Cr. Pro získání plně martenzitické struktury [14] je nutné snížit chromovou ekvivalentní hodnotu na nižší jak 13,5 a rozdílu mezi Cr a Ni ekvivalentem na hodnotu nižší jak 8. Nahrazením Mo prvkem W je vhodný způsob.

3. PROMÍSENÍ SVAROVÉHO KOVU

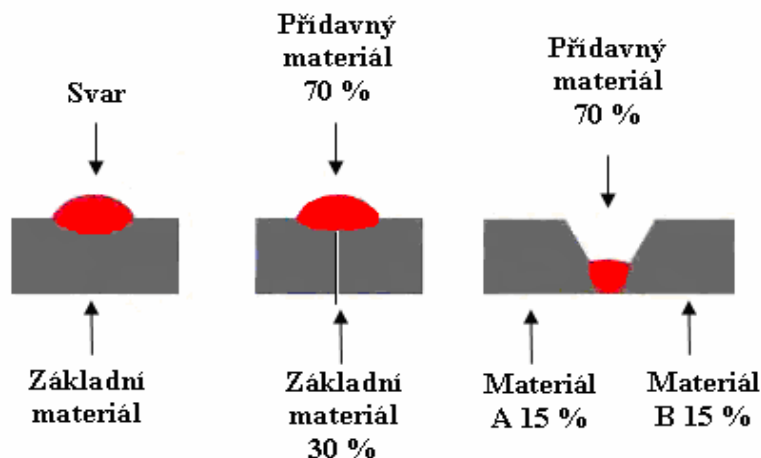
Promísení závisí na chemickém složení základního materiálu a přídavného materiálu do vzniklého svarového kovu. Kontrola promísení je důležitý faktor ovlivňující stanovení výsledné struktury. Promísení se počítá v procentech.

Promísení závisí také na velikosti svařovacího proudu. Tento vztah ukazuje Obr. 7, ze kterého je patrné, že velikost promísení se úměrně zvyšuje při zvyšujícím se svařovacím proudem a taky [15] geometrii svařovaných základních materiálu na Obr. 8.



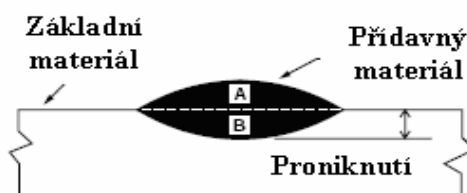
Obr. 7 – Diagram závislosti promísení na svařovacím proudem [17]

$$\text{Promísení \%} = \frac{\text{Hmotnost základního kovu}}{\text{Celková hmotnost svaru}} \times 100$$



Obr. 8 – Závislost pomísení na geometrii
svařovaných ploch [15]

Důležitou skutečností ovlivňující velikost promísení je metoda svařování. Obecně se ředění pohybuje mezi 15 % až 50 %, ale u jednotlivých metod se hodnoty liší, jak ukazuje Tab. 9. Výsledkem tohoto různého promísení je, že přídavný materiál musíme volit s ohledem na použitou metodu svařování.



Obr. 9 - Znázorňující promísení u jednoho základního materiálu [17]

Podle Obr. 9 lze promísení stanovit podle následujícího vzorce.

$$\text{Promísení \%} = \frac{B}{A + B} \times 100$$

Z dostupné literatury byla vytvořena Tab. 9 navrhuje doporučenou volbu ředění, mezi základními materiály a přídavným materiálem, která je u dané metody svařování. Je uvedeno také široké rozmezí, které bylo publikováno.

Tab. 9 – Rozbor jednotlivých metod a jejich ředění

Metoda	Rozmezí	Doporučeno	Literatura
111	20 % - 40 %	30 %	[15][20][21]
121	25 % - 50 %	35 %	[15][20]
131/135 (zkratový přenos)	15 % - 30 %	25 %	[15][20]
131/135 (sprchový přenos)	25 % - 50 %	35 %	[15][20]
131/135 (pulzní proud)	5 % - 15 %	10 %	[15]
141	8 % - 50 %	25 %	[15][20][21]

4. CÍLE

V zadání bakalářské práce je navržen program MS Excel na, kterém se má výsledná aplikace pro odhad výsledné struktury po svařování vysokolegovaných ocelí vytvořit. Tento program je velice rozšířený a má řadu uživatelů, a proto výsledná aplikace by měla být co jak nejjednodušší na ovládní a zároveň aby obsahovala všechny potřebné funkce. Využitím automatických funkcí, při naprogramování aplikace je jedna z možností.

Dnes existuje několik aplikací na odlišné platformě. Tyto mají několik nedostatků, které je nutné odstranit. Většinou jsou tvořeny jen jedním diagramem a to Schaefflerovým popřípadě dalšími dvěmi základními. V poslední době se objevily nové nebo zpřesňující diagramy, které jsou používány u jednotlivých materiálů a upřesňují výsledný odhad a tyto se nedostatečně využívají.

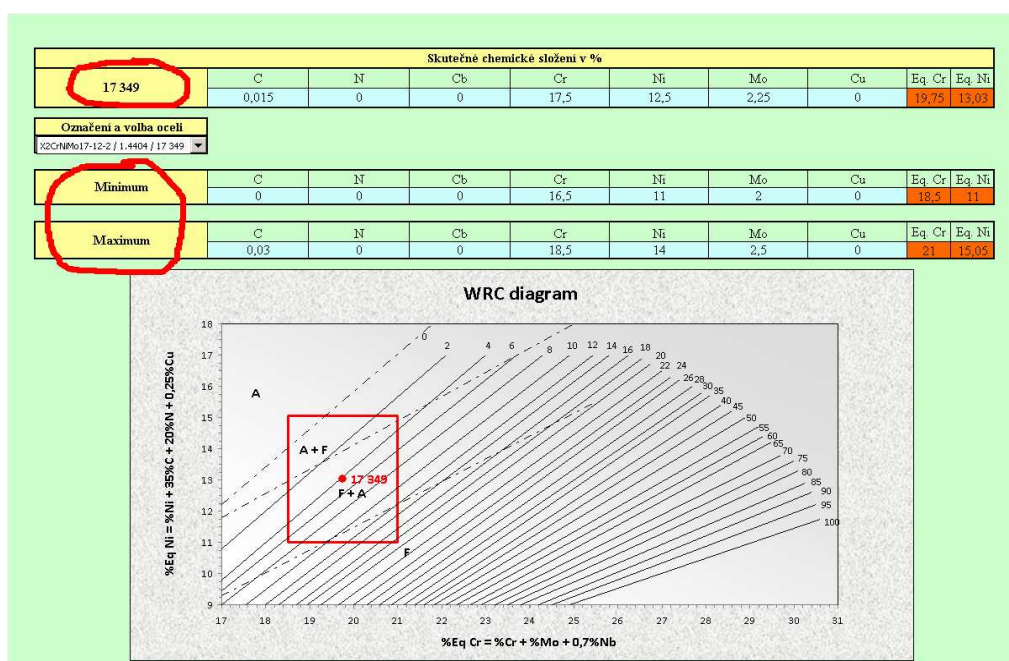
Již vytvořené aplikace postrádají širší možnost volby materiálu podle norem a taky přídatných materiálů v závislosti na metodě svařování. Není možné vytvořit si vlastní seznam jak základních materiálů tak přídatných materiálů, které by se vhodným způsobem mohly kombinovat.

Chybí taky funkce, která by uživatele varovala před možnými riziky výsledné struktury. Tohle je jeden z nejdůležitějších údajů, který by měl uživatel získat bez toho aby možná rizika zjišťoval z jiných zdrojů.

Odstraněním těchto nedostatků by se aplikace stala mnohem atraktivnějším pro uživatele. Výsledné odhady struktury by byly mnohem rychleji odhaleny za pomoci nejrůznějších funkcí, které by práci usnadnily.

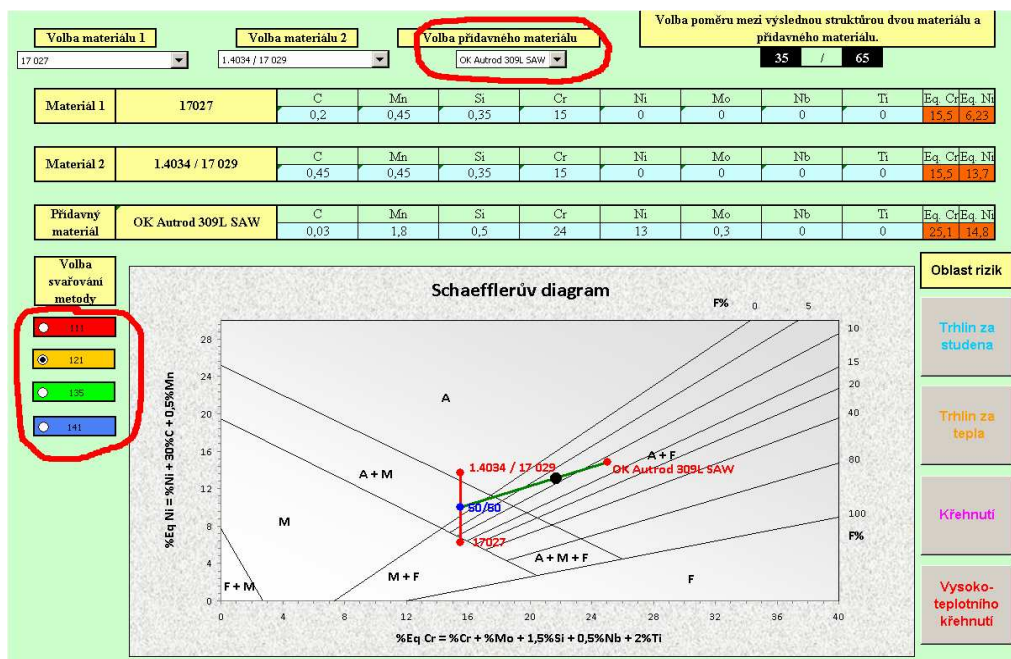
5. POPIS VYTVOŘENÉ APLIKACE

Vytvořená aplikace obsahuje 8 různých diagramů, které se uplatní u jednotlivých materiálů. Základní funkcí aplikace je po zadání materiálu, rozbor struktury s použitím min. a max. v % u jednotlivých prvků obsahující danou ocel. Na Obr. 10 je tato volba znázorněna ve druhém a třetím oddílu. V prvním oddílu je pak chemická struktura s přesnými hodnotami. Výsledný diagram pak znázorňuje strukturu, ve kterém se daný materiál nachází.



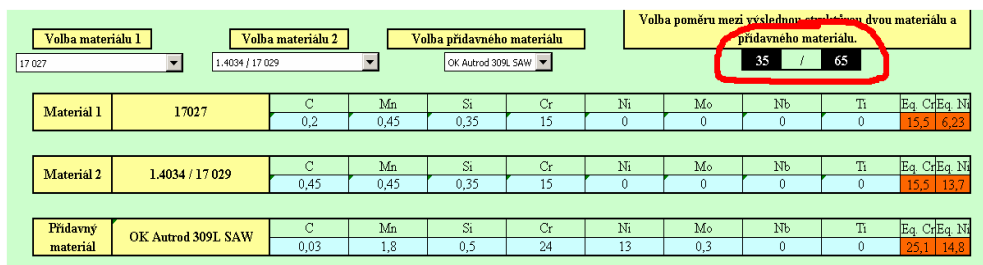
Obr. 10 – Diagram WRC znázorňující oblast struktury u materiálu podle ČSN typu 17 349

Hlavní Schaefflerův diagram má několik funkcí. Obsahuje přesné chemické složení dvou základních materiálů a přídavného materiálu. Tento přídavný materiál lze volit podle svařovací metody, kde aktuální zvolená metoda je 121, zobrazená na Obr. 11. Do funkce volba materiálu, jak u dvou základních tak jednoho přídavného materiálu lze vložit několik druhů materiálu podle vlastního uvážení. Tyto volby se provádějí na speciálních listech ve vytvořené aplikaci.

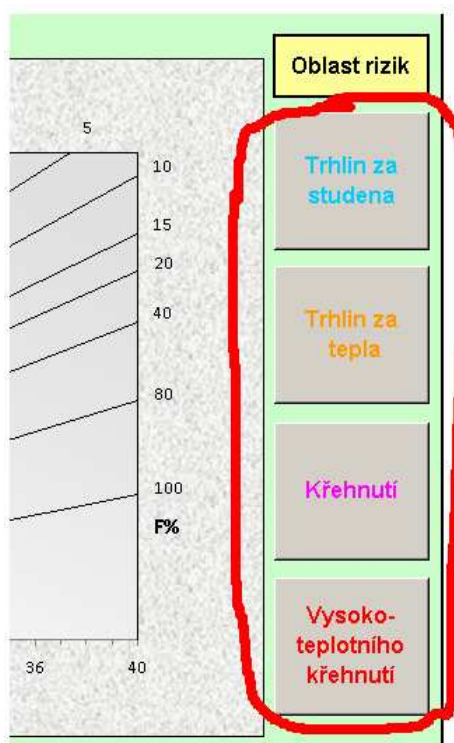


Obr. 11 – Schaefflerův diagram s jednotlivými funkcemi

Aplikace obsahuje funkci, která automaticky přiřadí vhodný poměr ředění svarového kovu, jako na Obr. 12 podle zvolené metody svařování. Poměr lze upravit podle vlastního uvážení i ručně.



Obr. 12 – Poměr ředění mezi dvěma základními materiály a přídavným materiálem



Obr. 13 – Funkce odhalující oblast rizik,
dané výsledné struktury

Důležitou funkcí je znázornění možných oblastí rizik u dané struktury. Tato volba je znázorněná na Obr. 13.

6. ODHAD STRUKTURY PODLE VYTVOŘENÉ APLIKACE

Výsledná aplikace byla ověřená na reálných datech. Toto ověření se realizovalo u svarového spoje dvou různých materiálu, které se často svařují. Použité byly i obvyklé svařovací metody.

Při odhadu výsledné struktury u vysokolegovaných svařovaných spojů je několik veličin, které ovlivňují tuto strukturu a proto se výsledná aplikace zabývá několika takovými vlivy. V aplikaci lze nastavit velikost ředění podle Tab. 9, Obr. 7 a Obr. 8.

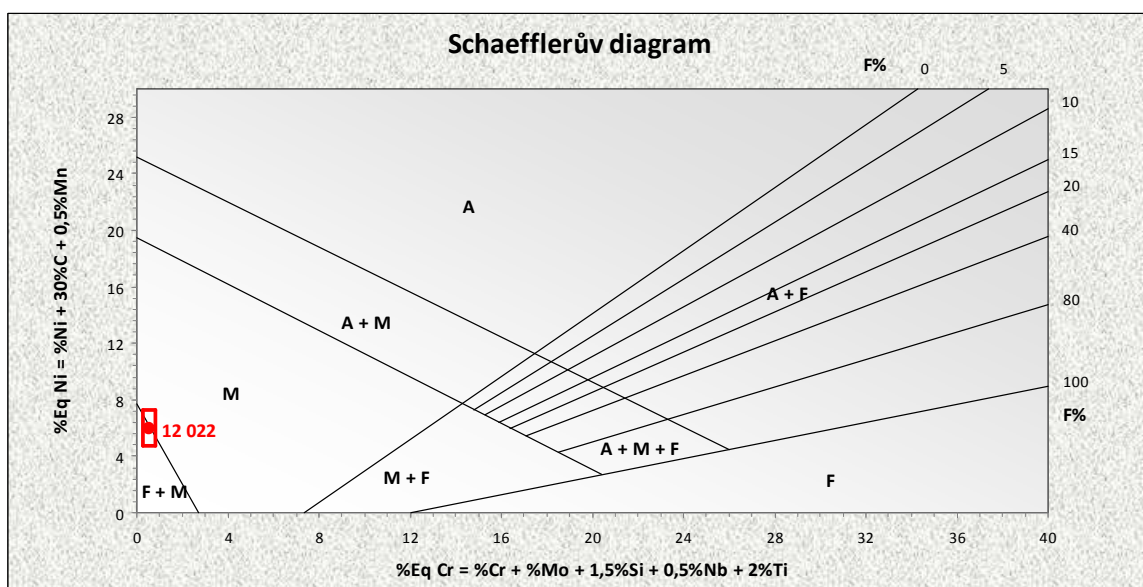
Svařovaný spoj tvoří dva odlišné materiály tzv. heterogenní spoj. První materiál je podle ČSN 41 2022 materiál typu 12 022 je to ocel se zvláštními vlastnostmi, pro práci za vyšších teplot, žárovevná pro namáhání při zvýšených teplotách v oblasti meze kluzu i meze tečení. Používá se na potrubí součástí energetických a chemických zařízení podle ČSN 13 0020, ČSN 42 0090 a ČSN 69 0010. Ocel má zaručenou minimální hodnotu meze kluzu za vyšších teplot.

Druhý materiál použity ke svařování je podle normy ČSN 41 7240 materiál typu 17 240. Ocel je vhodná pro chemické zařízení včetně tlakových nádob, pro prostředí oxidační povahy, pro silné anorganické kyseliny jen při velmi nízkých koncentracích a v oblasti normálních teplot. Ocel má zvláštní vlastnosti, fyzikálně chemické a korozivzdorné.

První materiál typu 12 022 a jeho chemické hodnoty rozepsané v Tab. 10 jsou doplněny do aplikace na výpočet odhadu výsledné struktury svarového kovu na Obr. 14. Výsledek rozboru ukazuje strukturu, kterou tento materiál obsahuje a to feriticko-martenzitickou a nebo martenzitickou.

Tab. 10 – Jednotlivé chemické prvky obsahující ocel 12 022 podle norem

12 022	C	Cr	Cu	Mn	Ni	Si	P	S
min. a max.	0,15	0	0	0,5	0	0,17	0	0
[%]	0,22	0,25	0,25	0,8	0,25	0,37	0,04	0,04
průměr v [%]	0,185	0,125	0,125	0,65	0,125	0,27	0,02	0,02

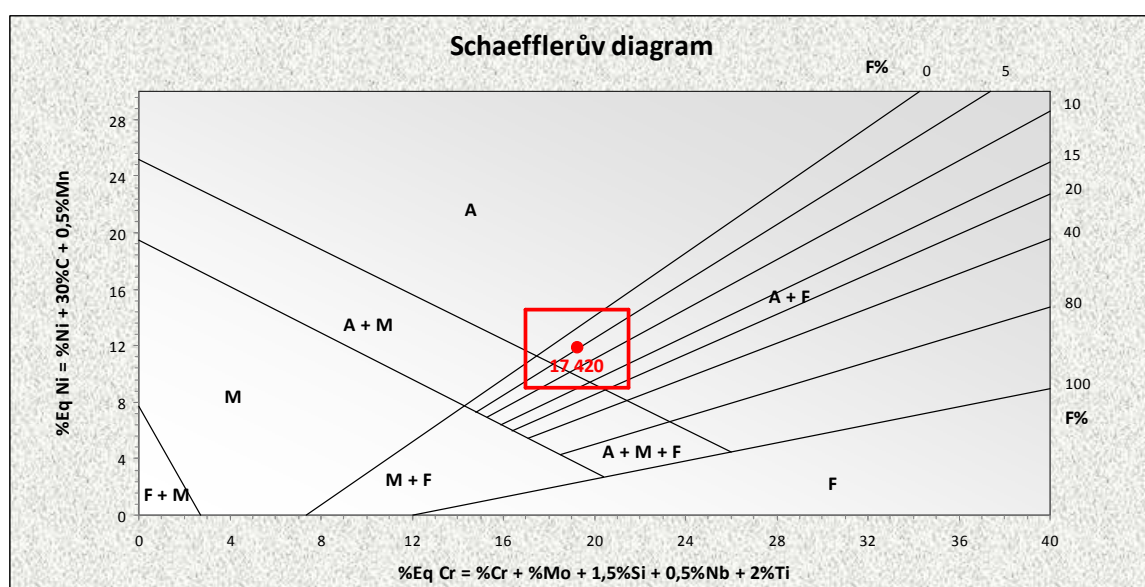


Obr. 14 – Popisující umístění materiálu typu 12 022 v Schaefflerově diagramu

Druhý materiál typu 17 240 s podrobným rozpisem chemického složení v Tab. 11 je dán opět do Schaefflerova diagramu. Materiál se skládá z austeniticko-feritické až austenitické struktury podle Obr. 15.

Tab. 11 – Jednotlivé chemické prvky obsahující ocel 17 240 podle norem

17 240	C	Cr	Mn	Ni	Si	P	S
min. a max.	0	17	0	9	0	0	0
[%]	0,07	20	2	11,5	1	0,04	0,03
průměr v [%]	0,035	18,5	1	10,25	0,5	0,02	0,015



Obr. 15 - Popisující umístění materiálu typu 17 240 v Schaefflerově diagramu

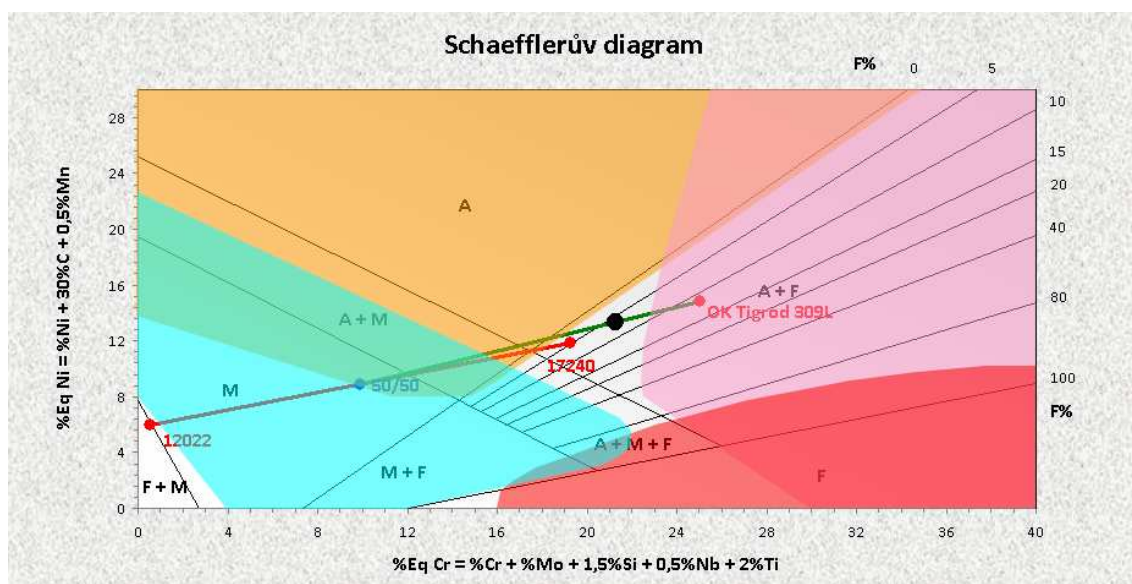
Tyto dva základní materiály jsou připraveny ke svařování v podobě úpravy hran do V o výšce 25 mm. Bude se svařovat dvěma metodami a to pro kořen metodou 141 s dvěma vrstvami s přídavným materiálem podle AWS A 5.9 a to ER 309L. Spoj se dokončí metodou 111 s cca. dvěma vrstvami svaru s přídavným materiálem podle AWS A 5.4 a to E 309 Mo L-17. Chemické složení obou přídavných materiálu je na Tab. 12.

Tab. 12 – Chemické složení dvou přídatných materiálů
podle firemní literatury ESAB

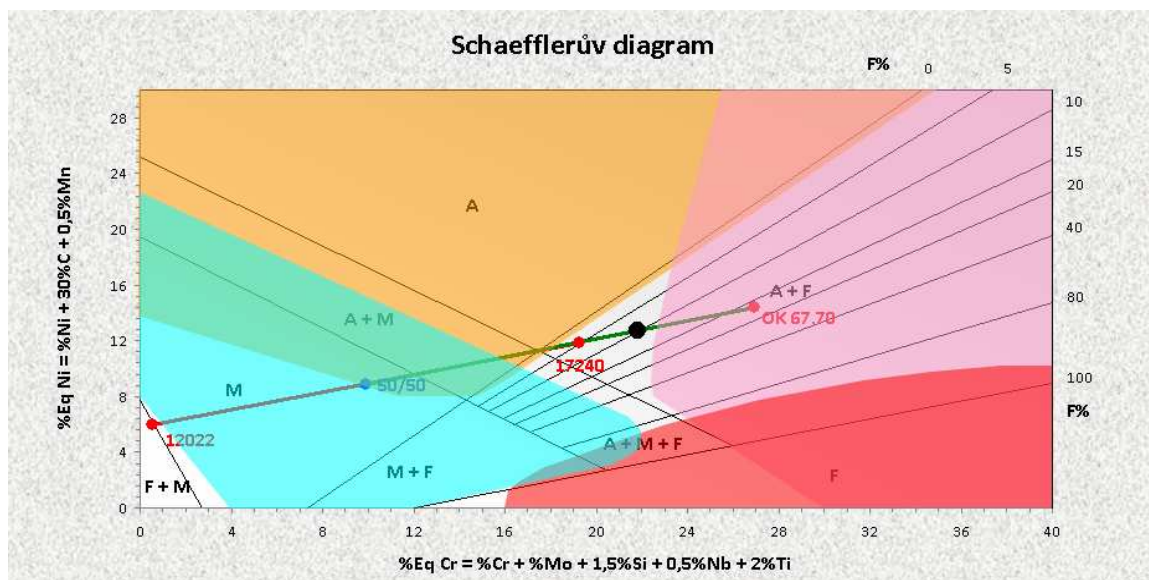
Metody svařování	C	Cr	Cu	Mn	Ni	Si	Mo
141 ER 309 L	0,03 %	24 %	0,3 %	1,8 %	13 %	0,5 %	0,3 %
111 E 309 MoL-17	0,03 %	23 %	0,3 %	0,9 %	13 %	0,75 %	2,8 %

Výsledný odhad struktury svarového kovu po jednotlivých metodách svařování je na Obr. 16 a Obr. 17. Z diagramu vyplývá, že struktura bude austenito-feritická. Velikost δ feritu bude mezi 5 % až 10 %. Takováhle struktura se vytvoří při dodržení správného postupu svařování, při průměrných hodnotách ředění dané metody svařování viz Tab. 9, dále dodržení velikosti parametrů elektrického proudu a za předpokladu správného chemického obsahu dvou základních materiálů a dvou přídatných materiálů dodaným výrobcem.

V diagramech jsou patrné také oblasti rizik, které naznačují možné vady svaru při nedodržení výše uvedených parametru. Při výsledku se dostáváme mimo tento rizikový prostor.



Obr. 16 – Výsledná struktura svarového kovu po svařování
metodou 141 označen na diagramu černým bodem



Obr. 17 – Výsledná struktura svarového kovu po svařování
metodou 111 označen na diagramu černým bodem

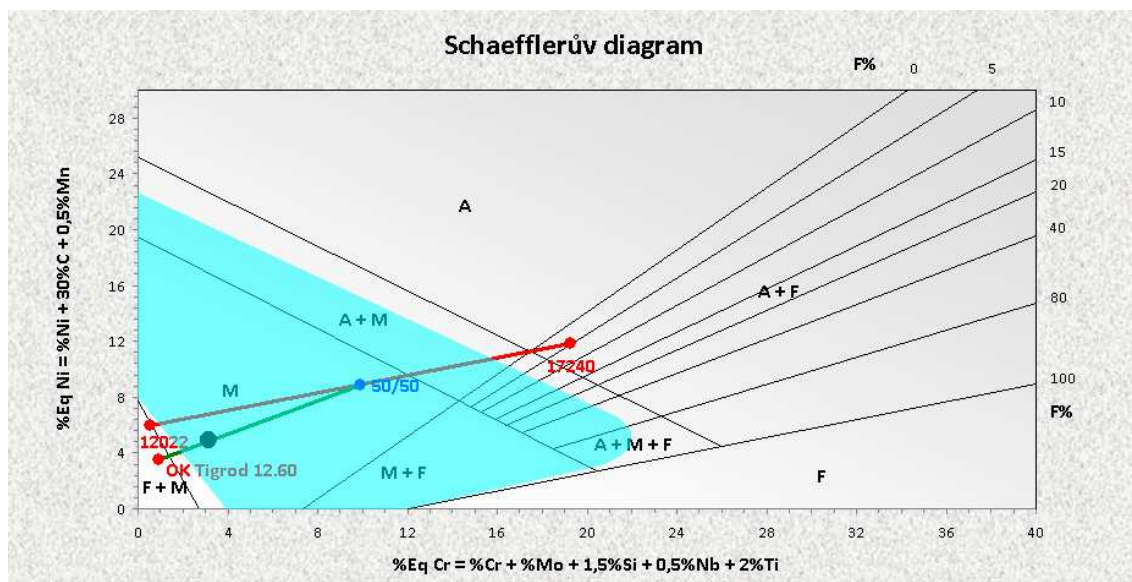
- označuje oblast s možným vznikem trhlin za studena při vytvrzování pod 400 °C
- označuje oblast náchylnou na trhliny za tepla při teplotách kolem 1250 °C
- oblast s rizikem křehnutí po tepelném zpracování mezi 500 °C – 900 °C
- vyznačuje oblast s rizikem vysokoteplotního křehnutí

Pro porovnání byl do diagramu na Obr. 18 vložen přídatný materiál, který svým chemickým složením neodpovídá vhodnou volbou a to typ podle AWS A 5.18 a to ER 70S-3 na Tab. 13.

Tab. 13 – Chemické složení přídatného materiálu
podle firemní literatury ESAB

Metody svařování	C	Mn	Si
141 ER 70S-3	0,1 %	1,1 %	0,6 %

Výsledná struktura svarového kovu je martenzitická, nachází se v diagramu v oblasti rizika s možným vznikem trhlin za studena při vytvrzování pod 400 °C. Tato struktura svarového kovu bude mít nevhodné mechanické vlastnosti a především náchylnost ke korozi.



Obr. 18 - Výsledná struktura svarového kovu po svařování špatným
přídavným materiálem metodou 141 označen na diagramu černým bodem

7. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá odhadem struktury svarového kovu vysokolegované ocele. V úvodní části se zabývá rozdělením vysokolegované ocele podle struktury a podle vlastností. Přesná charakteristika ocele zásadním způsobem ovlivňuje její možné svařování. Ovlivňuje jak případný předehřev, metodu svařování a popřípadě i její tepelné úpravy po svařování mimo jiné.

Studie byla prověřena experimentem na reálných datech u tzv. heterogenního svaru a to obvyklými svařovacími metodami, které se již na tento svarový spoj o takových parametrech použilo.

Výsledná aplikace přispěje ke snadnějším, rychlejším a přesnějším výsledkům, které zkvalitní postupy ve strojírenství v oboru svařování. Kvalitní výsledky přímo závisí na přesných a úplných údajích o jednotlivých materiálech. Bez těchto správných hodnot je odhad chybný.

Důležitým faktorem ovlivňující výslednou strukturu je samotný proces svařování, kde je potřeba dodržovat správnou technologii postupu svařování. Zásadně tak ovlivňuje předehřev, velikost proudu, rychlost svařování, poloha svařování apod.

Ke správnému odhadu struktury je nutné, aby uživatel této aplikace byl dostatečně vzdělán v oboru svařování. Mohlo by vést k nesprávné interpretaci výsledků a tím k chybným závěrům.

V kapitole o cílech je zmiňovaná část o nedostacích, které dnešní aplikace mají. Mezi ně patří malé množství diagramu. Výsledná aplikace tvoří mnohem víc diagramu než jiné běžně dostupné aplikace. Ty se využijí u specifických materiálových struktur základních materiálů.

Je možné také oproti běžným aplikacím doplnit vlastní seznamy základních i přídavných materiálů. To urychlí výsledky při častém opakování stejných materiálů u svařování používaných uživatelem.

Funkce odhalující oblasti rizik, které okamžitě upozorní uživatele na tyto rizika, také mnohé aplikace postrádaly. Tato funkce je vhodným doplněním, které uživatel určitě využije.

Snadná obsluha a jednoduchost aplikace se širokou paletou možností využití jednotlivých funkcí je vhodným nástrojem pro pracovníky řešící problém odhadu struktury svařovaného spoje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovou a zliatin*. Bratislava : Slovenská polygrafia, 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5.
- [2] NĚMEC, Josef. *Svařování korozivzdorných a žárovzdorných ocelí*. Praha : Sntl, 1975. 168 s.
- [3] ČSN EN 1011-3. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálu - Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha : Český normalizační institut, Duben 2002. 24 s.
- [4] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. 1. vydání. Ostrava : [s.n.], 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [5] MOHYLA, Miroslav. *Strojírenské materiály I*. 2. vydání. Ostrava : [s.n.], 2006. 146 s. ISBN 80-248-0270-8.
- [6] CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí : Materiály a jejich použití* [online]. Lucembursko : [s.n.], 2007 [cit. 2010-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.euro-inox.org/>>. ISBN 978-2-87997-177-3.
- [7] *Korozivzdorné oceli - vlastnosti* [online]. Lucembursko : [s.n.], 2002 [cit. 2010-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.euro-inox.org/>>. ISBN 2-87997-082-2.
- [8] *Co je to korozivzdorná ocel ?* [online]. Brusel : [s.n.], 2005 [cit. 2010-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.euro-inox.org/>>.
- [9] MARTINEC, Jiří ; ŠVEIDLER, Zdeněk; JANOVEC, Jiří. Korozivzdorné materiály : Základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. *Svět svaru* [online]. 2007, XI, 2, [cit. 2010-03-22]. Dostupný z WWW: <www.svetsvaru.cz>.
- [10] HAJDÍK, Jiří ; HEINRICH, Michal. Svařování vysokolegovaných ocelí : 1. část. *Svět svaru* [online]. 2007, XI, 2, [cit. 2010-03-22]. Dostupný z WWW: <www.svetsvaru.cz>.
- [11] MARTINEC, Jiří . Svařování korozivzdorných materiálů. *Svět svaru* [online]. Září/2004, VIII, 3, [cit. 2010-03-22]. Dostupný z WWW: <www.svetsvaru.cz>.
- [12] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Čtvrté doplněné vydání. Úvaly : Albra, 2008. 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [13] BALMFORTH, M.C.; LIPPOLD, J.C. A New Ferritic-Martensitic Stainless Steel. *Welding Research*. Prosinec, 2000, 12, s. 339 - 345.
- [14] ONORO, J. Martensite microstructure of 9–12%Cr steels weld metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, 180, s. 137-142.

- [15] *Wear Management* [online]. 2009 [cit. 2010-04-30]. Repair welding. Dostupné z WWW: <<http://www.wear-management.ch/?path=root+repairwelding&lang=en>>.
- [16] COETZEE, M.; PISTORIUS, P.G.H. The welding of experimental low-nickel Cr-Mn-N stainless steels containing copper. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1996, č. 3, s. 99-108.
- [17] The Worldwide Manufacturer : *Kobelco welding consumables for stainless steels*. In *kobelco welding today*: Kobelco, 2004. s. 20.
- [18] Materials Testing Newsletter. *Nuts & Bolts*. Zima 2002, 16, s. 1 - 4.
- [19] *Koroze kovů* [online]. 2006 [cit. 2010-05-10]. Protikorozní ochrana volbou materiálu. Dostupné z WWW:<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/>.
- [20] ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001
- [21] KOU,S *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987

Děkuji Ing. Vladislavu Ochodkovi z katedry mechanické technologie VŠB-TU Ostrava za podněty k řešení práce a za poskytnutí nejnovější odborné literatury.